

АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И ВАРИАТИВНОСТИ СИГНАЛОВ ЭКГ В НОРМЕ И С ПРИЗНАКАМИ АРИТМИИ

А. В. Адамова¹, К. М. Буданов², А. В. Кузьмин³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹alicegarth@gmail.com, ²ko13bud@rambler.ru, ³a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Вычисление и сравнительный анализ параметров variability сердечного ритма и variability сигналов является актуальной задачей классификации аритмичных и нормальных сигналов электрокардиограммы (ЭКГ). Целью являются сравнительный анализ статистических показателей variability сердечного ритма и variability сигналов ЭКГ двумя методами и оценка различий параметров на разных видах сигнала. *Материалы и методы.* В качестве исходных данных выбраны две группы сигналов из открытой базы данных PhysioNet: полученные от здоровых людей и людей, у которых наблюдаются аритмические нарушения. Для данных сигналов были построены гистограммы распределений плотности вероятности их амплитудных характеристик и относительных приращений ряда кардиоинтервалов. Рассчитаны площади несовпадения гистограмм в качестве метрик их различия. *Результаты.* Проведена оценка различия показателей variability сигнала ЭКГ и variability ритма сердца на основе усредненных гистограмм распределений значений сигналов ЭКГ для каждой группы и вычисления отношения площади области несовпадения к общей площади гистограммы, при этом соотношение для первого метода составило 48 %, а для второго – от 33 до 38 % для различных показателей. *Выводы.* Полученные данные показывают потенциальную применимость обоих методов для анализа сигналов ЭКГ на предмет наличия признаков аритмии.

Ключевые слова: статистический показатель, variability, гистограмма, интервал, сигнал ЭКГ

Для цитирования: Адамова А. В., Буданов К. М., Кузьмин А. В. Анализ статистических показателей variability сердечного ритма и variability сигналов ЭКГ в норме и с признаками аритмии // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 3. С. 167–178. doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-13

ANALYSIS OF STATISTICAL INDICATORS OF HEART RATE VARIABILITY AND ECG SIGNAL VARIABILITY NORMALLY AND WITH SIGNS OF ARRHYTHMIA

A.V. Adamova¹, K.M. Budanov², A.V. Kuzmin³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia
¹alicegarth@gmail.com, ²ko13bud@rambler.ru, ³a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Abstract. Background. Calculation and comparative analysis of heart rate variability and variability parameters is an urgent task of classification of arrhythmic and normal ECG signals. The objective is a comparative analysis of statistical indicators of heart rate variability and ECG signal variability by two methods and assessment of differences in parameters for different types of signal. **Materials and methods.** Two groups of signals from the open PhysioNet database were selected as initial data: those obtained from healthy people and those with arrhythmic disorders. For these signals, histograms of the probability density distribution of their amplitude characteristics and relative increments of a number of cardiointervals were constructed. The areas of mismatch of the histograms were calculated as metrics of their difference. **Results.** An assessment was made of the difference in the indicators of ECG signal variability and heart rate variability based on the averaged histograms of the distributions of ECG signal values for each group and the calculation of the ratio of the area of the mismatch region to the total area of the histogram, while the ratio for the first method was 48 %, and for the second – from 33 to 38 % for various indicators. **Conclusions.** The obtained data show the potential applicability of both methods for analyzing ECG signals for signs of arrhythmia.

Keywords: statistical indicator, variability, histogram, interval, ECG signal

For citation: Adamova A.V., Budanov K.M., Kuzmin A.V. Analysis of statistical indicators of heart rate variability and ECG signal variability normally and with signs of arrhythmia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2025;(3):167–178. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-3-13

Введение

Сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) можно рассматривать в качестве основного показателя состояния сердечно-сосудистой системы. Сердце функционирует ритмично, поэтому любое отклонение от ритмического характера сигнала следует интерпретировать как заболевание или аномалию. Однако анализ длительных сигналов ЭКГ является очень сложной и трудоемкой задачей. Существует множество статистических показателей и методов анализа, применяемых при обработке сигналов ЭКГ, которые могут использоваться при классификации сигналов, состояний и заболеваний [1, 2].

Сигнал ЭКГ, как и большинство биомедицинских сигналов, имеет нестационарные характеристики. Это означает, что характеристики сигнала меняются с течением времени или в зависимости от вида деятельности и состояния здоровья человека. Разработан ряд методик оценки характеристик и классификации сигналов, основанных на статистических показателях.

К характеристикам во временной области относятся, в частности, параметры variability сердечного ритма (BCP). Параметры BCP отражают изменения частоты сердечных сокращений и могут быть измерены в виде RR-интервалов. Разброс интервалов RR наглядно демонстрирует variability сердечного ритма. Для понимания изменчивости временных интервалов RR для различных сигналов используются диаграммы размаха и диаграммы с областями. Описательные статистические показатели, такие как среднее значение, медиана, дисперсия и стандартное отклонение, помогают понять характеристики наборов данных, и эти показатели далее могут использоваться в качестве признаков для классификации и для систем поддержки принятия врачебных решений [3].

Можно выделить основные методики анализа ЭКГ, основанные на следующих статистических методах:

1) определение простейших характеристик временных промежутков (NN-интервалов) между QRS-комплексами в длительной записи ЭКГ (в частности, средняя длина и размах длин интервалов) [4, 5];

2) определение статистических временных показателей, полученных на основе ряда длин NN-интервалов или ряда разностей длин соседних NN-интервалов (в частности, стандартные отклонения длительностей NN-интервалов, вычисленные по 5-минутным или суточным записям ЭКГ) [4, 5];

3) геометрическое представление последовательности длин NN-интервалов или последовательности разности длин соседних NN-интервалов в виде гистограмм плотности распределения [4, 5];

4) спектральный анализ, предполагающий выделение полос высокочастотной, низкочастотной и очень низкочастотной компонент и заключающийся в измерении спектральной плотности мощности на основе подсчета количества NN-интервалов, соответствующих каждой из компонент (применяется к записям ЭКГ длительностью не более 5 минут) [4, 5];

5) нелинейный анализ, основанный на теории хаоса и фрактальной математике, при изучении поведения случайной компоненты биосигнала, зависящей от состояния человека или наличия у него той или иной патологии [4, 5];

6) статистический анализ на основе замены кардиоинтервалов на ряд их относительных приращений (для длительных записей ЭКГ) [6];

7) анализ геометрического представления распределения вариативности ЭКГ-сигнала в виде гистограмм плотности вероятности их амплитудных характеристик [7].

Таким образом, существует довольно большой набор применяемых на практике методик анализа ВСР, в том числе рассчитываемых достаточно сложным образом и имеющих свои ограничения и особенности применения. В то же время для анализа вариативности сигнала ЭКГ может применяться основанный на амплитудной дискриминации способ, который является достаточно простым в технической реализации и пригодным для применения в носимых устройствах. Задача данного исследования состоит в оценке различия показателей вариативности ритма сердца и вариативности сигнала ЭКГ для выборок данных, полученных от пациентов с патологиями сердечно-сосудистой системы и контрольной группы.

Материалы и методы

Одним из способов статистического исследования сигналов ЭКГ является анализ гистограмм, отражающих распределение плотности вероятности их амплитудных характеристик [7].

Рассмотрим цифровой сигнал ЭКГ, представленный совокупностью значений u_i^j , измеренных в определенные моменты времени (отсчеты) в каждом отведении, где $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, k$; n – число отсчетов в отведении; k – число отведений. Таким образом, каждый сигнал состоит из nk значений.

При проведении анализа сигналов ЭКГ необходимо обеспечить их сопоставимость. Исследуемые сигналы могут иметь различную частоту дискретизации и амплитуду, продолжительность по времени, поэтому при проведении

сравнительного анализа необходимо выбирать сигналы, имеющие одинаковую частоту и временную продолжительность. В этом случае число отсчетов для различных сигналов также будет совпадать. Это является критичным для данного способа, поскольку его основной метрикой является отсчет.

Различия в амплитуде сигналов можно устранить путем нормирования значений сигнала по следующей формуле [8, 9]:

$$\widetilde{u}_i^j = \frac{u_i^j - \min_i u_i^j}{\max_i u_i^j - \min_i u_i^j}, \quad (1)$$

где $\widetilde{u}_i^j$ – нормированное i -е значение сигнала в отведении с номером j ; u_i^j – фактическое i -е значение сигнала в отведении с номером j ; $\min_i u_i^j$ – минимальное значение сигнала в отведении с номером j ; $\max_i u_i^j$ – максимальное значение сигнала в отведении с номером j .

Процедура нормирования преобразует диапазон значений каждого отведения для каждого сигнала в интервал от 0 до 1. Таким образом, обеспечивается возможность сравнения данных по различным отведениям одного и того же сигнала ЭКГ, а также одинаковых отведений по различным сигналам.

Для формирования гистограммы по нормированным данным разбиваем диапазон значений сигнала на заранее выбранное число интервалов m и определяем количество значений сигнала, находящихся в границах каждого из интервалов. Для получения наиболее точной формы распределения сигнала необходимо оптимизировать число интервалов.

Если требуется сравнить сигналы, содержащие различное количество отсчетов, то для получения корректных результатов следует рассматривать гистограммы относительных частот – оценок плотности вероятности попадания значений сигнала в тот или иной интервал.

Для оценки различий сигналов ЭКГ также можно использовать метод статистического анализа относительных приращений ряда кардиоинтервалов, предложенный д.м.н. В. Ф. Федоровым [6, 10], в котором основной метрикой является RR-интервал. Реализация данного метода предполагает выполнение следующих операций:

– задание скользящего окна в 200 кардиоинтервалов для последовательной обработки;

– преобразование ряда кардиоинтервалов в ряд логарифмов их относительных приращений: $\tau_n = \lg\left(\frac{T_n}{T_{n-1}}\right)$, где T_n – это длительность кардиоцикла

с номером n , а τ_n – логарифм его относительного приращения по сравнению с предыдущим;

– разделение всех полученных значений логарифмов на положительные и отрицательные;

– вычисление статистических характеристик отдельно для положительных и отдельно для отрицательных значений: мощность полуразделения (доля относительных приращений), мода (M), стандартное отклонение (σ);

–вычисление отдельно для каждого полураспределения «интегрального показателя», показывающего направление динамики регуляции сердечного

ритма (ускорение/замедление): $K = \frac{1}{\sqrt{|M|\sigma}}$;

–вычисление показателя вегетативного баланса – отношения коэффициентов для отрицательного и положительного баланса: $B = K(n) / K(p)$;

–сдвиг окна на 10 кардиоциклов и повторение алгоритма.

Ширина и сдвиг скользящего окна были предложены автором данного метода как некий компромисс между увеличенным размером скользящего окна для повышения математической корректности процедур и оценок, построенных на них, и уменьшенным размером окна для повышения физиологической корректности (при тестах с физической нагрузкой артериальное давление сильно повышается, следовательно, статистические параметры будут сильно отличаться).

Для решения поставленной задачи были выбраны сигналы ЭКГ, находящиеся в базах интернет-ресурса Physionet.org [11]: Mit-bih-normal-sinus-rhythm-database-1.0.0 (ЭКГ здоровых людей, 18 сигналов от разных людей, каждый из сигналов представлен в двух отведениях, частота измерения сигнала 128 Гц) [12] и Mit-bih-supraventricular-arrhythmia-database-1.0.0 (ЭКГ пациентов с наджелудочковой аритмией, 78 сигналов от разных людей, каждый из сигналов представлен в двух отведениях, частота измерения сигнала 128 Гц) [13]. Для обеспечения сравнимости данных было выбрано одинаковое количество значений для каждого сигнала (230 400 отсчетов).

Результаты и обсуждение

Каждый из сигналов в каждой выборке был обработан по двум описанным выше методам. В результате были получены гистограммы распределения амплитуд каждого из сигналов по $m = 32$ интервалам нормированных значений. Далее по каждой выборке была построена усредненная гистограмма. В качестве частоты каждого из интервалов было взято среднее значение частот данного интервала по фактическим гистограммам сигналов выборки.

В качестве показателя вариативности было выбрано отношение площади области несовпадения, применяемое при анализе двумерных изображений [14] между двумя усредненными гистограммами к общей площади гистограммы. Под общей площадью гистограммы понимается площадь гистограммы, соответствующей максимальным частотам (нормального или аритмического распределения) по каждому интервалу:

$$S = \left(\sum_{l=1}^m |f_l^{norm} - f_l^{ar}| \right) / \left(\sum_{l=1}^m \max\{f_l^{norm}, f_l^{ar}\} \right) \cdot 100 \%. \quad (2)$$

По каждому интервалу l были вычислены модуль разности между частотами усредненных гистограмм, соответствующих здоровым людям f_l^{norm} и пациентам с аритмией f_l^{ar} , а также максимальная частота (f_l^{norm} или f_l^{ar}), соответствующая тому или иному распределению.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 1, 2, где по оси абсцисс указаны обозначения интервалов нормированных значений сигнала ЭКГ, а по оси ординат – количество значений сигнала, относящихся к соответствующим интервалам.

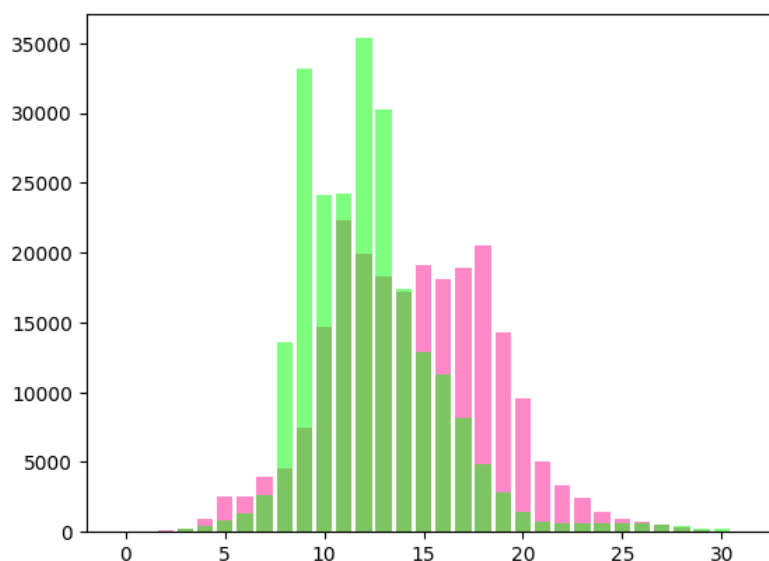


Рис. 1. Усредненные гистограммы распределения сигналов первого отведения, полученные на основе способа определения показателей вариативности временных параметров сигнала ЭКГ (зеленый цвет – норма, розовый – аритмия, темно-зеленый – пересечение значений)

На рис. 1 показано, что на интервалах от 1-го до 7-го наблюдается незначительное различие между распределениями нормальных и аритмичных сигналов с доминированием аритмичного распределения. Интервалы с 8-го по 10-й, а также с 12-го по 13-й представляют собой область заметного расхождения распределений нормальных и аритмичных сигналов с доминированием нормального распределения.

С 16-го по 23-й интервал наблюдается заметное расхождение распределений нормальных и аритмичных сигналов с доминированием аритмичного распределения. При этом диапазон интервалов, на котором существенно преобладает распределение аритмичных сигналов, значительно шире диапазона преобладания распределения нормальных сигналов. Начиная с 24-го интервала можно отметить практическое отсутствие различий между распределениями нормальных и аритмичных сигналов.

В целом можно отметить чередование диапазонов преобладания того или иного распределения сигналов (нормальных или аритмичных). В крайних интервалах диапазона различия распределений сигналов практически отсутствуют.

На рис. 2 показана гистограмма значений, формирующих числитель в формуле (2), полученных с помощью способа анализа геометрического представления распределения вариативности ЭКГ-сигнала.

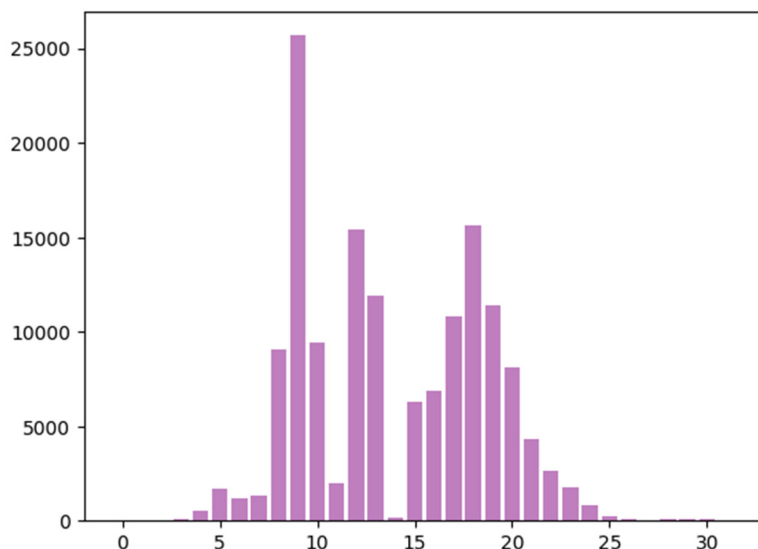


Рис. 2. Область несовпадения гистограмм, полученная способом определения показателей вариативности временных параметров сигнала ЭКГ

Из рис. 2 видно, что область несовпадения гистограмм состоит из двух частей: левая (интервалы от 4-го до 13-го) получена в основном за счет доминирования распределения нормальных сигналов над распределением аритмичных, а правая (от 15-го интервала до 25-го) – за счет доминирования распределения аритмичных сигналов над распределением нормальных.

Можно отметить, что часть крайних интервалов слева (от 1-го до 3-го) и справа (от 26-го до 32-го), а также 14-й интервал не вносят существенного вклада в формирование области несовпадения гистограмм. Наибольший вклад в формирование области несовпадения вносит 9-й интервал, на котором распределение нормальных сигналов доминирует над распределением аритмичных сигналов.

Расчетное значение площади области несовпадения гистограмм составило 147 973, общей площади гистограммы – 304 386. Итоговое значение соотношения площадей равно $S = 48,6 \%$.

На рис. 3 представлены результаты сравнений гистограмм для параметров на основе замены ряда кардиоинтервала на относительные приращения.

Для интегрального показателя обоих рядов значений – как отрицательного (рис. 3,а), так и положительного (рис. 3,б) – с 1-го по 12-й интервал гистограммы преобладают контрольные значения, с 13-го по 17-й заметно доминирование аритмичных, начиная с 18-го интервала появляется различие между этими рядами, в отрицательном продолжает доминирование аритмичных, а в положительном – контрольных.

Начиная с 24-го интервала оба набора значений не демонстрируют заметного преобладания какого-либо набора данных. Для вегетативного баланса (рис. 3,в) 1–5-й интервалы показывают очевидное преобладание контрольных значений; начиная с 6-го интервала появляется групповое чередование аритмичных и контрольных, а с 17-го интервала гистограммы различия между наборами данных практически отсутствуют.

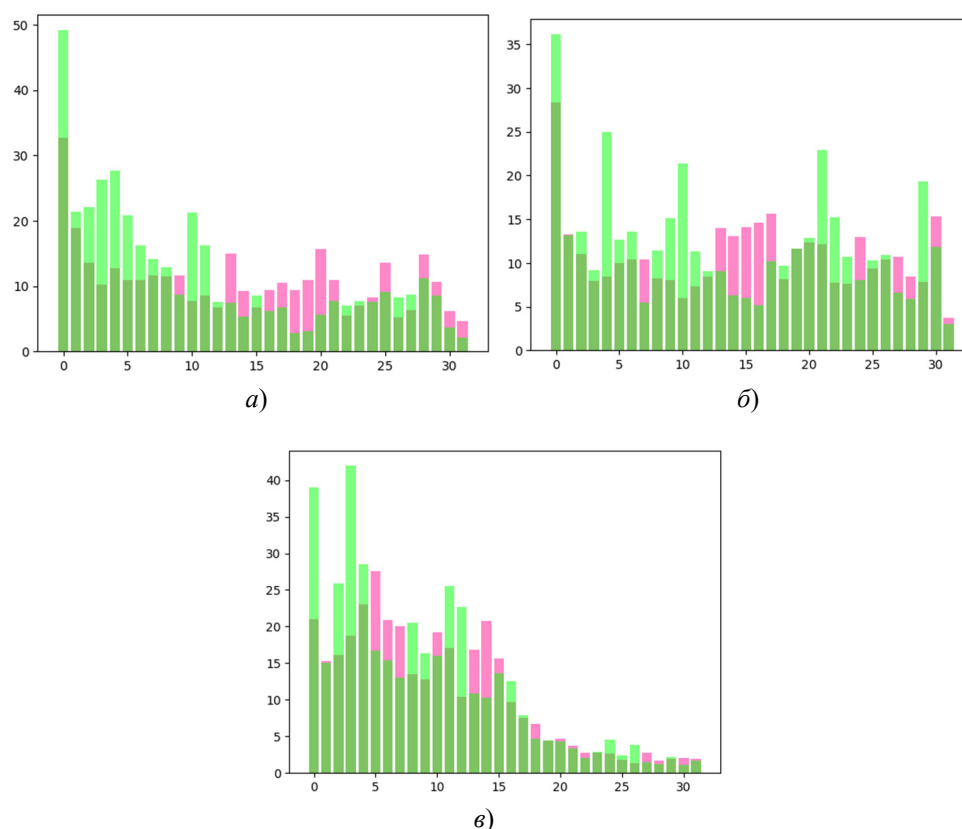


Рис. 3. Гистограммы распределения сигналов первого отведения, полученные с помощью алгоритма статистического анализа относительных приращений ряда кардиоинтервалов:
 а – интегральный показатель отрицательного ряда значений;
 б – интегральный показатель положительного ряда значений;
 в – показатель вегетативного баланса (зеленый цвет – норма, розовый – аритмия, темно-зеленый – пересечение значений)

На рис. 4 показана гистограмма значений, формирующих числитель в формуле (2), полученных с помощью алгоритма статистического анализа относительных приращений ряда кардиоинтервалов.

У интегрального показателя как для отрицательного ряда значений (рис. 4,а), так и для положительного (рис. 4,б), площадь несовпадения очевидна на всей гистограмме, притом если с 1-го по 12-й интервал свой вклад вносит преобладание значений параметров контрольных сигналов, то далее, с 13-го по 17-й интервал, замечен рост влияния аритмичных параметров; правая же часть, начиная с 23-го интервала гистограммы, не может считаться информативной по причине отсутствия доминирования какого-либо набора данных.

На гистограмме вегетативного баланса (рис. 4,в) в крайней левой части доминирование контрольного набора является очевидным; стоит отметить, что наибольшие значения площади несовпадения дают именно параметры контрольных сигналов.

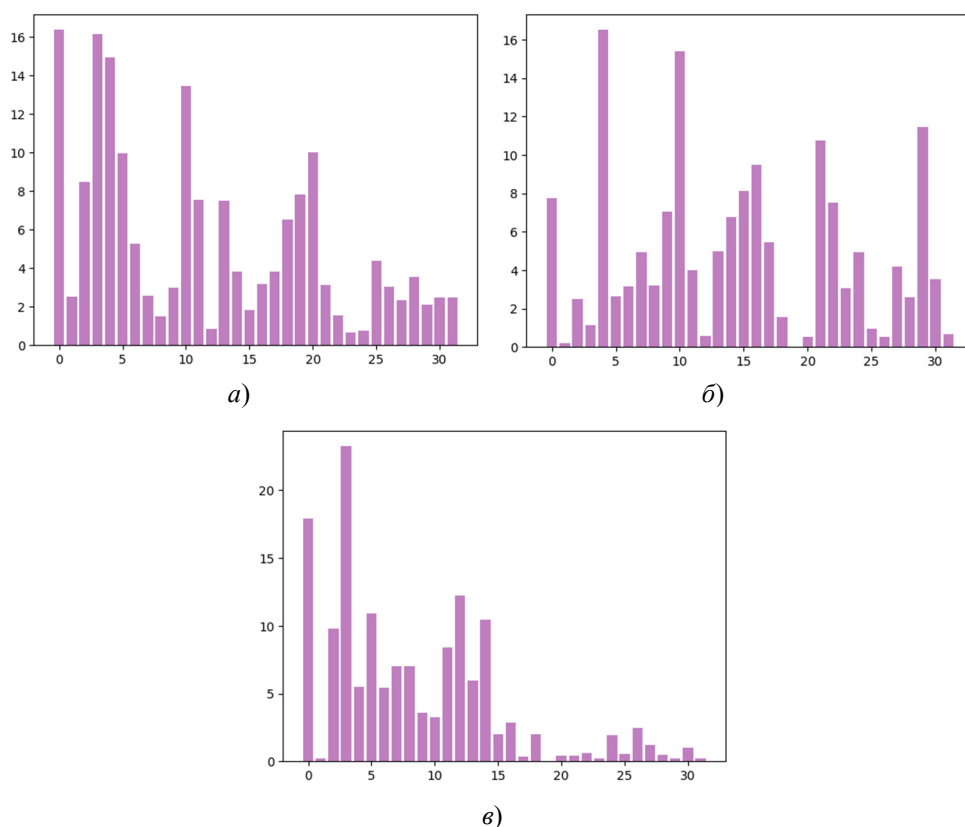


Рис. 4. Область несовпадения гистограмм:
 а – интегральный показатель отрицательного ряда значений;
 б – интегральный показатель положительного ряда значений;
 в – показатель вегетативного баланса

Расчетное значение площади области несовпадения гистограмм по каждому из типов: $K(n)=173,55$, $K(p)=156$ и $B=148,06$. Расчетное значение общей площади гистограмм по типам: $K(n)=456,54$, $K(p)=447,76$ и $B=443,79$. Итоговое значение соотношений площади области несовпадения к общей площади составило по типам: $S_{K(n)}=38\%$, $S_{K(p)}=34,8\%$ и $S_B=33,4\%$. Наиболее значимое различие демонстрирует интегральный показатель отрицательного ряда значений.

Оба способа продемонстрировали значительное различие между областью несовпадения и общей областью гистограммы, что подтверждает их применимость для решения задачи классификации сигналов ЭКГ и выявление участков с признаками аритмии в компьютеризированных медицинских диагностических системах [15].

Поскольку расчеты были проведены только для двух выборок ограниченного объема, в дальнейшем можно исследовать различия между средней гистограммой по каждой выборке и фактическими гистограммами, на основе которых она была получена. Это позволит определить «коридор», в котором могут находиться фактические гистограммы по каждой выборке, и выяснить,

не будет ли перекрытия этих «коридоров» для сигналов, относящихся к различным выборкам. Требуется дальнейшего изучения и вопрос о причинах существования интервалов гистограмм, на которых различия в распределениях нормальных и аритмичных сигналов отсутствуют.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования было выявлено, что гистограммы, соответствующие сигналам ЭКГ условно здоровых людей и сигналы ЭКГ признаками аритмии, отличаются между собой. В качестве метрики использовалась величина площади области несовпадения гистограмм, которая оказалась отличной от нуля.

Проведена оценка различия показателей вариативности сигнала ЭКГ и вариабельности ритма сердца на основе усредненных гистограмм распределений значений сигналов ЭКГ для каждой группы и вычисления отношения площади области несовпадения к общей площади гистограммы, при этом соотношение для первого метода составило 48 %, а для второго – от 33 до 38 % для различных показателей. Полученные данные показывают потенциальную применимость обоих способов анализа параметров сигнала ЭКГ для обнаружения признаков аритмии.

Список литературы

1. Clifford G. D., Azuaje F., McSharry P. Advanced Methods And Tools for ECG Data Analysis. New York : Artech House Publishers, 2006. 400 p.
2. Bajaj V., Sinha G. R. Modelling and Analysis of Active Biopotential Signals in Healthcare. IOP Publishing, 2020. Vol. 1. 443 p. (IPEM–IOP Series in Physics and Engineering in Medicine and Biology).
3. Демушкина К. М., Демушкин М. О., Кузьмин А. В. Обзор методов проектирования систем поддержки принятия врачебных решений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 75–89. doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-6
4. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании электрокардиографических систем. Методические рекомендации // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–87.
5. Task force of the european society of cardiology and the north american society of Pacing and electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // European heart journal. 1996. № 17. P. 354–381.
6. Fedorov V. F. Time series analysis in self-regulating systems // Journal of Radio Electronics. 2019. № 5. С. 1–10.
7. Патент № 2827482 С1 Российская Федерация, МПК А61В 5/352. Способ определения показателей вариативности временных параметров электрокардиографического сигнала / Кузьмин А. В., Гасанова В. А., Пушкарева А. В. [и др.] – № 2023127657 ; заявл. 27.10.2023 ; опубл. 27.09.2024.
8. Glantz S. A. Primer of biostatistics. 7 ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 312 с.
9. Мамаев А. Н., Кудлай Д. А. Статистические методы в медицине. М. : Практическая медицина, 2021. 136 с.
10. Fedorov V. F., Stolyar V. L. Heart Rate Variations Analysis: Traditions, Misconceptions, Perspectives // 23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow, 2021. P. 1–5.
11. Goldberger A. L., Amaral L. A. N., Glass L. [et al.]. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals // Circulation. 2000. № 101 (23). P. 215–220.

12. MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database. URL: <http://www.physionet.org/physiobank/database/nsrdb/> (дата обращения: 16.05.2025).
13. MIT-BIH Supraventricular Arrhythmia Database. URL: <http://www.physionet.org/physiobank/database/svdb/> (дата обращения: 16.05.2025).
14. Патент № 2372844 C1 Российская Федерация, МПК A61B 6/00, A61B 5/107. Способ автоматического определения размеров и положения сердца пациента по флюорографическим снимкам / Бодин О. Н., Кузьмин А. В., Семенкин М. А., Моисеев А. Е. – № 2008123240/14 ; заявл. 16.06.2008 ; опубл. 20.11.2009.
15. Rangayyan R. M., Krishnan S. *Biomedical Signal Analysis*. Wiley, 2024. doi: 10.1002/9781119825883

References

1. Clifford G.D., Azuaje F., McSharry P. *Advanced Methods And Tools for ECG Data Analysis*. New York: Artech House Publishers, 2006:400.
2. Bajaj V., Sinha G.R. *Modelling and Analysis of Active Biopotential Signals in Healthcare*. IOP Publishing. 2020;(1):443.
3. Demushkina K.M., Demushkin M.O., Kuzmin A.V. Review of design methods for medical decision support systems. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):75–89. (In Russ) doi: 10.21685/2227-8486-2022-2-6
4. Baevsky R.M., Ivanov G.G., Chireikin L.V. Analysis of heart rate variability using electrocardiographic systems. Methodical recommendations. *Vestnik aritmologii = Bulletin of Arrhythmology*. 2001;(24):65–87. (In Russ)
5. Task force of the european society of cardiology and the north american society of Pacing and electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European heart journal*. 1996;(17):354–381.
6. Fedorov V.F. Time series analysis in self-regulating systems. *Journal of Radio Electronics*. 2019;(5):1–10.
7. Патент № 2827482 C1 Russian Federation, MPK A61B 5/352. *A method for determining the variability of time parameters of an electrocardiographic signal*. Kuz'min A.V., Gasanova V.A., Pushkareva A.V. et al. № 2023127657; appl. 27.10.2023; publ. 27.09.2024 (In Russ)
8. Glantz S.A. *Primer of biostatistics. 7 ed*. New York: McGraw-Hill, 2012:312.
9. Mamaev A.N., Kudlay D.A. *Statisticheskie metody v meditsine = Statistical methods in medicine*. Moscow: Prakticheskaya meditsina, 2021:136. (In Russ)
10. Fedorov V.F., Stolyar V.L. Heart Rate Variations Analysis: Traditions, Misconceptions, Perspectives. *23rd International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*. Moscow, 2021:1–5.
11. Goldberger A.L., Amaral L.A.N., Glass L. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation*. 2000;(101):215–220.
12. MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database. Available at: <http://www.physionet.org/physiobank/database/nsrdb/> (accessed 16.05.2025).
13. MIT-BIH Supraventricular Arrhythmia Database. Available at: <http://www.physionet.org/physiobank/database/svdb/> (accessed 16.05.2025).
14. Патент № 2372844 C1 Russian Federation, MPK A61B 6/00, A61B 5/107. *A method for automatically determining the size and position of a patient's heart from fluorographic images*. Bodin O.N., Kuz'min A.V., Semenkin M.A., Moiseev A.E. № 2008123240/14; appl. 16.06.2008; publ. 20.11.2009. (In Russ)
15. Rangayyan R.M., Krishnan S. *Biomedical Signal Analysis*. Wiley, 2024. doi: 10.1002/9781119825883

Информация об авторах / Information about the authors

Алиса Викторовна Адамова
аспирант, ассистент кафедры
информационно-вычислительных
систем, Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alicegarth@gmail.com

Alisa V. Adamova
Postgraduate student, assistant of the
sub-department of information and
computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Константин Михайлович Буданов
старший преподаватель кафедры
информационно-вычислительных
систем, Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ko13bud@rambler.ru

Konstantin M. Budanov
Senior lecturer of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Викторович Кузьмин
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
информационно-вычислительных
систем, Пензенский государственный
университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuzmin
Doctor of technical sciences, associate
professor, head of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 10.01.2025

Поступила после рецензирования/Revised 13.05.2025

Принята к публикации/Accepted 18.07.2025